

컴퓨터 형성 홀로그램과 광전자적 추출 알고리즘을 이용한 디지털 워터마킹 방법

조규보 · 신창목[†] · 김수중

경북대학교 전자전기컴퓨터학부
⊕ 701-702 대구광역시 북구 산격동 1370

(2005년 10월 7일 받음, 2006년 2월 15일 수정본 받음)

본 논문에서는 컴퓨터 형성 홀로그램을 이용하여 디지털 데이터의 저작권을 보호할 수 있는 워터마킹 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 제작된 컴퓨터 형성 홀로그램으로부터 분리된 두개의 위상 변조된 무작위패턴을 생성시켜 하나는 원 영상에 삽입된 워터마크 영상으로 사용하고 다른 하나는 워터마킹 된 영상에서 워터마크 영상을 추출하기 위한 디코딩 키로 사용된다. 워터마킹 된 영상의 제작과정은 수치 해석적으로 수행하고 워터마크 영상은 광학적인 방법으로 추출한다. 제안된 방법은 워터마킹 된 영상이 절단에 대해서 강인함을 컴퓨터 모의실험을 통해 확인하였고, 위상변조 특성이 있는 액정 광변조기를 이용하여 광학적으로 구현하였다.

주제어 : Digital watermarking, Computer-Generated Hologram (CGH).

I 서 론

최근 인터넷의 눈부신 발전으로 문서, 영상, 음성 등이 디지털화 되고 나날이 발전하는 디지털 신호처리기술을 통해 그 매체들에 대한 무제한적인 복제가 가능하게 되었으므로 위와 같은 디지털 데이터의 저작권 보호와 인증이 반드시 필요하게 되었다. 이러한 불법복제를 막기 위한 방법으로 디지털 워터마킹 기술^[1-7]이 활발하게 연구 개발 되고 있다. 디지털 워터마킹이란 디지털 콘텐츠의 저작권 보호를 목적으로 저작권 정보를 사람의 눈이나 귀를 통해 쉽게 감지하기 어려운 정도로 디지털 이미지나 오디오, 그리고 비디오 신호를 삽입함으로써 소유권을 확인할 수 있어 영상의 불법적인 사용을 방지하는 방법이다. 삽입된 저작권 정보는 디코딩 알고리즘을 통해 다시 추출이 가능해야 하며, 특별한 경우 복호화 키가 필요하기도 하다. 한편, 디지털 워터마킹 기술을 무효화 시키는 방법(attack) 및 회전, 크기 및 JPEG(MPEG) 압축 등의 신호처리에 대처하는 기술들이 꾸준히 연구되어 왔다. 또한 절단에 대해서도 강인한 특성을 가지는 홀로그램 방법도 연구되고 있다.

본 논문에서는 컴퓨터 형성 홀로그램(computer generated hologram:CGH)을 디지털 워터마킹에 적용하여 마크 영상의 진위여부를 검증 및 확인하기 위해 광전자적 추출 알고리즘을 사용하였다. 광전자적 추출 알고리즘이란 본 논문에서 먼저 마크 영상은 디지털적인 방법으로 생성시키고 진위 판별을 위한 복호화 과정은 광학적으로 추출하는 알고리즘을 말한다. 먼저, 원 영상에 숨기기 위해 사용될 마크 영상을 제작하기 위해 하나의 이진 컴퓨터 형성 홀로그램에서부터 생성되어진 두개의 그레이 무작위 패턴을 생성시킨 후 각각 전

영역에 걸쳐 확산형태로 무작위 위상변조를 수행하게 한다. 둘 중 하나를 선택하여 원 영상에 선형 중첩 시켜 워터마킹 된 영상을 얻는다. 마크 영상의 추출 과정에서는 다른 하나의 위상 변조된 무작위 패턴을 이용하여 위상변조 특성이 있는 액정 공간광변조기(liquid crystal spatial light modulator:LC SLM)를 사용하여 광학적으로 마크 영상의 진위를 확인한다. 기존 워터마킹 기술들의 광학적 구현 방법은 배포되는 워터마킹 된 영상과 원 영상을 간섭계를 통해 가간섭성의 성질을 이용하여 마크 영상을 추출하거나^[6] 결합변환상관기 등을 이용한 침투치를 확인하여 영상의 진위를 판별하였다^[7]. 본 논문에서는 추출 과정에서 원 영상을 이용하지 않으므로 보안 수준이 높으며 추출 과정에서 광의 고속성을 이용할 수 있으므로 계산 시간을 절약할 수 있다. 또한 제안된 방법이 홀로그램의 특성이 있으므로 임의의 절단된 영상에 대해서도 마크 영상이 추출될 수 있음을 확인하였다.

II. 제안된 워터마킹 방법

2.1 워터마크 생성 과정

본 논문에서 제안된 워터마크의 생성을 위한 블록도는 그림 1과 같다. 디지털 워터마크 생성에 사용될 마크 영상을 생성하기 위해 SA(simulated annealing) 알고리즘^[8]을 이용하여 원 영상 $f(x,y)$ 로부터 이진 위상 홀로그램 $h(\zeta,\eta)$ 를 생성한다. 이진 위상 홀로그램으로부터 두개의 무작위 그레이 패턴 $r_1(\zeta,\eta)$ 과 $r_2(\zeta,\eta)$ 을 분리할 수 있으며 이들의 관계는

$$h(\zeta,\eta) = r_1(\zeta,\eta) + r_2(\zeta,\eta) \quad (1)$$

와 같으며 여기서 $r_1(\zeta,\eta)$ 와 $r_2(\zeta,\eta)$ 는 $[0, 1]$ 에서 무작위 분포 되어 있다. $h(\zeta,\eta)$ 를 구성하는 각 화소 값들은 원래 '1'

[†] E-mail: lensless@ee.knu.ac.kr

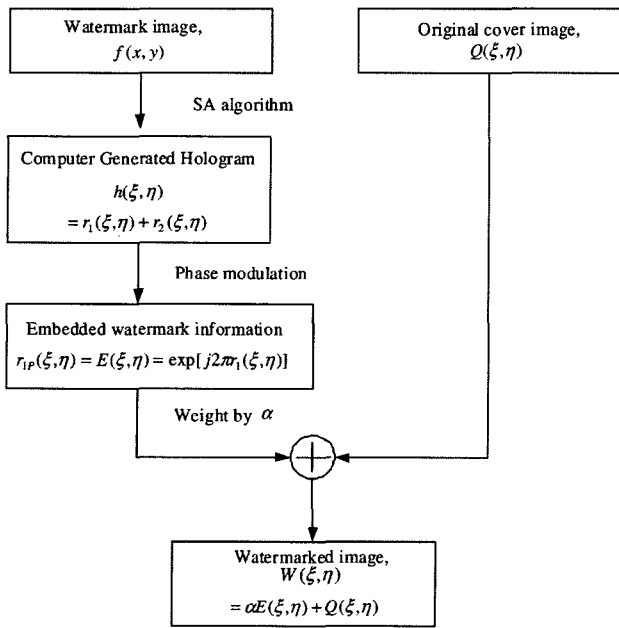


그림 1. 제안된 워터마크 생성 블록도.

$[\exp(j0)]$ 과 $-1[\exp(j\pi)]$ 값을 갖지만 위상 변조가 됨을 고려하여 '1'과 '0'값을 갖도록 하였고 무작위로 분포되어 있다.

이들을 홀로그램 전체에 걸쳐 확산 시키는 무작위 위상변조를 수행하면

$$\begin{aligned} r_{1p} &= E(\zeta, \eta) = \exp[j2\pi r_1(\zeta, \eta)] \\ r_{2p} &= K(\zeta, \eta) = \exp[j2\pi r_2(\zeta, \eta)] \end{aligned} \quad (2)$$

와 같으며 여기서 $r_{1p}(\zeta, \eta)$ 와 $r_{2p}(\zeta, \eta)$ 는 $r_1(\zeta, \eta)$ 와 $r_2(\zeta, \eta)$ 의 위상 변조된 성분을 나타낸다. 이들 중 하나는 워터마크 형성 과정에서 마크 정보로 사용되는 인코딩 키(encoding key)의 역할을 하며 $E(\zeta, \eta)$ 로 나타내고, 다른 하나는 마크 영상의 추출 과정에서 디코딩 키(decoding key)의 역할을 하며 $K(\zeta, \eta)$ 로 나타낸다.

디지털 워터마킹은 원 영상에 적당한 세기의 인코딩 키를 선형 중첩시킴으로써

$$\begin{aligned} W(\zeta, \eta) &= \alpha \exp[j2\pi r_1(\zeta, \eta)] + O(\zeta, \eta) \\ &= \alpha r_{1p}(\zeta, \eta) + O(\zeta, \eta) \\ &= \alpha E(\zeta, \eta) + O(\zeta, \eta) \end{aligned} \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 여기서 원 영상과 인코딩 키 영상을 동일 평면상에 나타내기 위해 좌표를 (ζ, η) 로 통일하였다. $O(\zeta, \eta)$ 는 $[0, 1]$ 에서 분포되는 그레이 원 영상을 나타내고, α 는 워터마크의 세기를 나타내는 상수이다. 일반적으로 α 를 증가시킬 경우 여러 가지 신호처리 등의 공격에 강한 특성을 가지나 워터마킹 영상의 질을 저하시키는 단점이 있고, 감소시킬 경우에는 영상의 질이 감소되지 않지만 각종 신호처리에 약한 단점을 가지고 있다. 그러므로 α 의 크기는 워터마크의

강인성을 유지하면서 영상의 질을 저하시키지 않는 범위 내에서 절충, 선택되어야 할 것이다.

2.2 워터마크 추출 과정

제안된 추출 과정은 그림 2와 같으며, 숨겨진 영상을 디코딩 하기 위해 워터마킹 된 영상과 식 (2)에서의 디코딩 키를 곱하여 푸리에 변환을 수행하여 마크 영상을 복원할 수 있으며 영상의 진위 여부를 판별할 수 있다. 복원 과정은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} R(x, y) &= \mathcal{F}\{K(\zeta, \eta) W(\zeta, \eta)\} \\ &= \mathcal{F}\{K(\zeta, \eta)[\alpha E(\zeta, \eta) + O(\zeta, \eta)]\} \\ &= \mathcal{F}\{r_{2p}(\zeta, \eta)[r_{1p}(\zeta, \eta) + O(\zeta, \eta)]\} \\ &= \mathcal{F}\{\exp[j2\pi r_2(\zeta, \eta)](\alpha \exp[j2\pi r_1(\zeta, \eta) + O(\zeta, \eta)])\} \\ &= \mathcal{F}\{\alpha \exp[j2\pi(r_{1p}(\zeta, \eta) + r_{2p}(\zeta, \eta))]\} \\ &\quad + \mathcal{F}\{O(\zeta, \eta) \exp[j2\pi r_2(\zeta, \eta)]\} \\ &= \mathcal{F}\{\alpha \exp[j2\pi h(\zeta, \eta)]\} \\ &\quad + \mathcal{F}\{O(\zeta, \eta) \exp[j2\pi r_2(\zeta, \eta)]\} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 는 $\{\cdot\}$ 의 푸리에 변환을 나타낸다. 위 식 (4)의 첫 번째 항은 식 (1)에서와 같이 1차 위치에서만 영상이 추출되도록 SA 알고리즘을 이용하여 제작되어진 컴퓨터 형성 홀로그램이 위상 변조된 형태를 가지며 이의 푸리에 변환은 식 (5)와 같이 Zernike의 위상차 기술(phase contrast technique)^[9]의 수학적 근사화 방법을 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\mathcal{F}\{\alpha \exp[j2\pi h(\zeta, \eta)]\} \\ &= \alpha \mathcal{F}\left\{1 + j[2\pi h(\zeta, \eta)] - \frac{1}{2}[2\pi h(\zeta, \eta)]^2 + \frac{1}{3}[2\pi h(\zeta, \eta)]^3 - \dots\right\} \end{aligned}$$

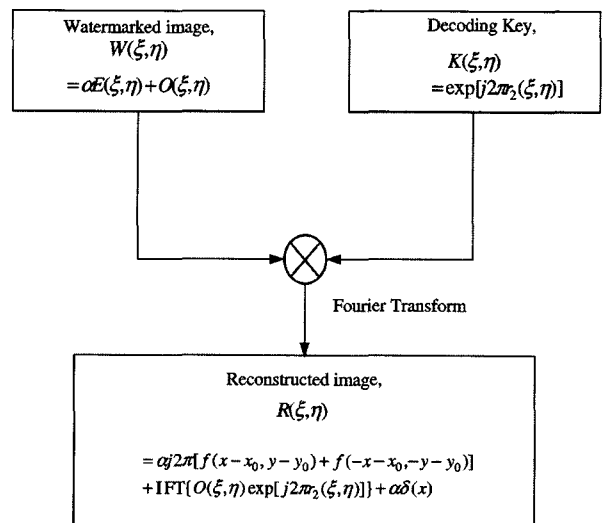


그림 2. 마크 영상 추출 블록도.

$$\begin{aligned} &\approx \alpha \mathcal{F}\{1 + j[2\pi h(\zeta, \eta)]\} \\ &= \alpha j 2\pi \mathcal{F}\{h(\zeta, \eta)\} + \alpha \mathcal{F}\{1\} \\ &\approx \alpha j 2\pi [f(x - x_0, y - y_0) + f(-x - x_0, -y - y_0)] + \alpha \delta(x, y) \quad (5) \end{aligned}$$

여기서, x_0 와 y_0 는 추출 시 생성되는 원 영상의 위치를 나타낸다. $\delta(x, y)$ 는 dirac delta 함수를 나타내며 영상 재생 시 영차 항에서 나타나는 DC 성분을 의미한다. 실제 광학적으로 영상을 재생할 때 이 영차 항은 매우 큰 값을 가지므로 1차 항에서 재생되는 재생 영상의 가시성에 영향을 미치므로 공간 필터를 이용하여 차단한다.

식 (4)의 두 번째 항은 전 영역에 걸쳐 무작위 분포되는 백색 잡음으로 작용하게 된다. 재생 된 영상을 인간 시각으로 확인하기 위해서는 식 (4)의 두 번째 항보다 첫 번째 항의 세기 레벨이 높아야 된다.

III. 컴퓨터 모의 실험

제안된 워터마킹 방법의 성능을 알아보기 위해 이진 영상을 원 영상으로 하는 이진 위상 홀로그램을 마크 영상으로 하여 컴퓨터 모의 실험을 하였다. 그림 3(a)는 크기가 64×64인 이진 위상 홀로그램이고, 그림 3(b)와 (c)는 홀로그램으로부터 분리되어진 무작위 위상 변조패턴으로 각각 인코딩 키

와 디코딩 키를 나타낸다. 그림 4(a)와 (b)는 각각 64×64크기의 그레이 레벨 원 영상과 워터마킹 된 영상을 나타낸다. 그림 5(a)는 단순히 CGH영상을 푸리에 변환을 이용하여 재생시킨 영상을 나타내고 그림 5(b)는 워터마킹 된 영상을 복원 과정을 통해 재생한 영상을 나타낸다. 재생 된 영상은 비축 홀로그램의 특성에 따라 원점에 대칭적으로 가상 영상과 실 영상이 분리되어 나타난다.

제안된 방법이 절단에 대해 강인한 특성을 가지는지를 확인하기 위해 워터마킹 된 영상을 적당한 비율로 절단하여 마크 영상을 재생하는 모의 실험을 수행하였다. 그림 6(a), (c), (e)는 워터마킹된 영상을 그림 4(b)를 수직 방향으로 각각 25%, 50%, 75% 절단한 영상이고, 이 영상들에 대해 재생된 마크 영상은 그림 6(b), (d), (f)와 같다. 재생된 마크 영상은 그림 5(b)에 비해 잡음이 많이 가해졌으나 인간 시각으로 구분이 가능하므로 제안된 방법이 절단에 대해 강인함을 알 수 있다. 재생된 마크 영상의 식별 가능 정도를 알아보기 위해 각각의 절단된 워터마킹 된 영상으로부터 재생된 마크 영상의 오차의 정량적 측정 척도로써 MSE(mean squared error)와 PSNR(peak signal to noise ratio)^[10]을 식 (6)과 식(7)처럼 정의하였다.

$$MSE[R_d(\zeta, \eta)] = \left\{ \frac{1}{M \times N} \sum_{\zeta=0}^{M-1} \sum_{\eta=0}^{N-1} \|R(\zeta, \eta) - R_d(\zeta, \eta)\|^2 \right\} \quad (6)$$

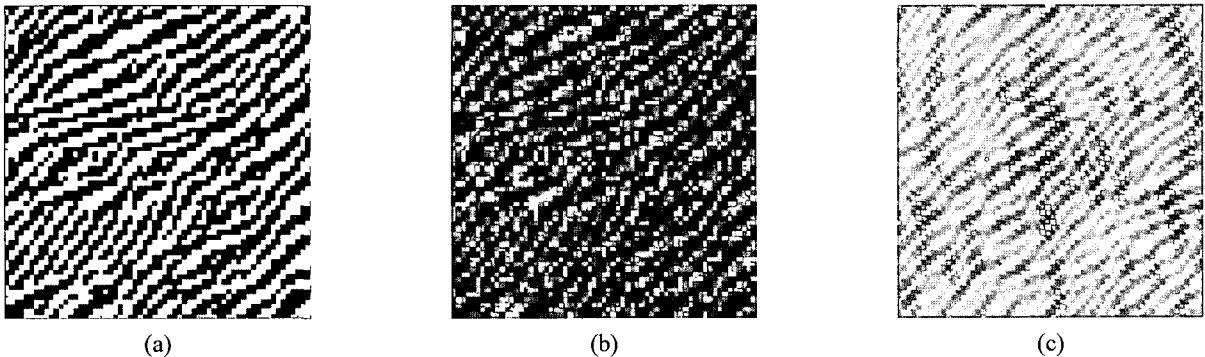


그림 3. (a) 이진 위상 CGH 영상, (b) 위상 변조된 무작위 패턴 (인코딩 키), (c) 위상 변조된 무작위 패턴 (디코딩 키).

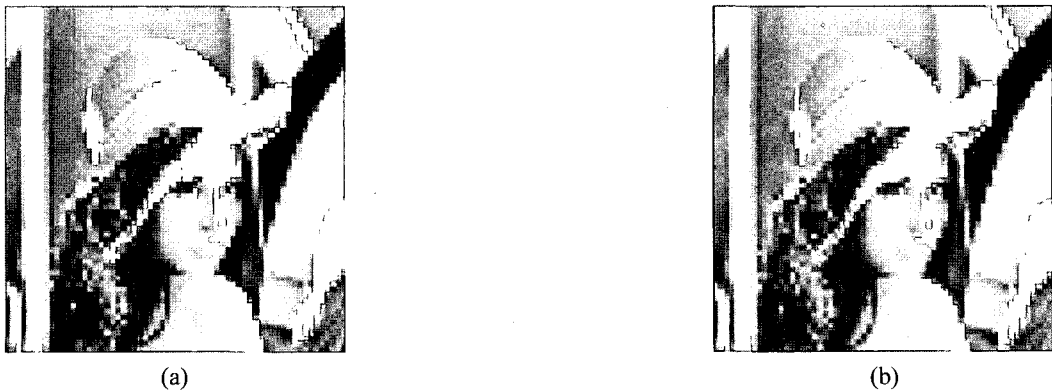


그림 4. (a) 원 영상, (b) 워터마킹 된 영상.

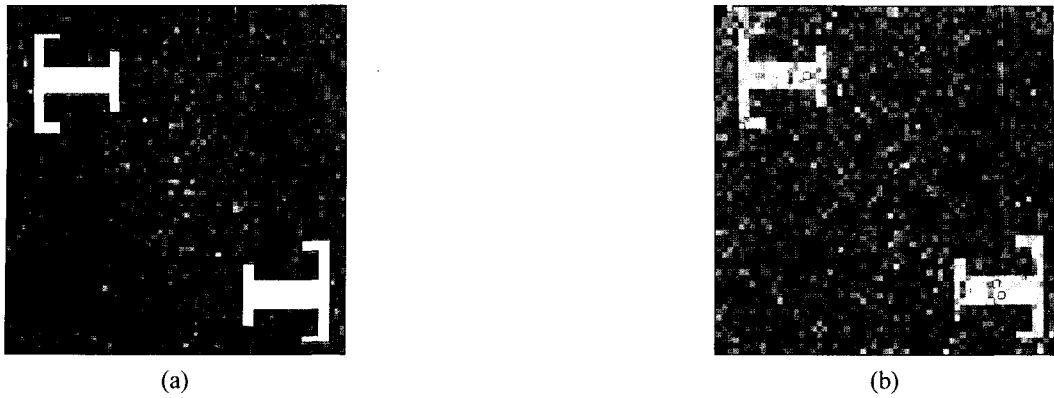


그림 5. (a) CGH로부터 재생된 마크 영상, (b) 디코딩 키에 의해 워터마킹 된 영상으로부터 재생된 마크 영상.

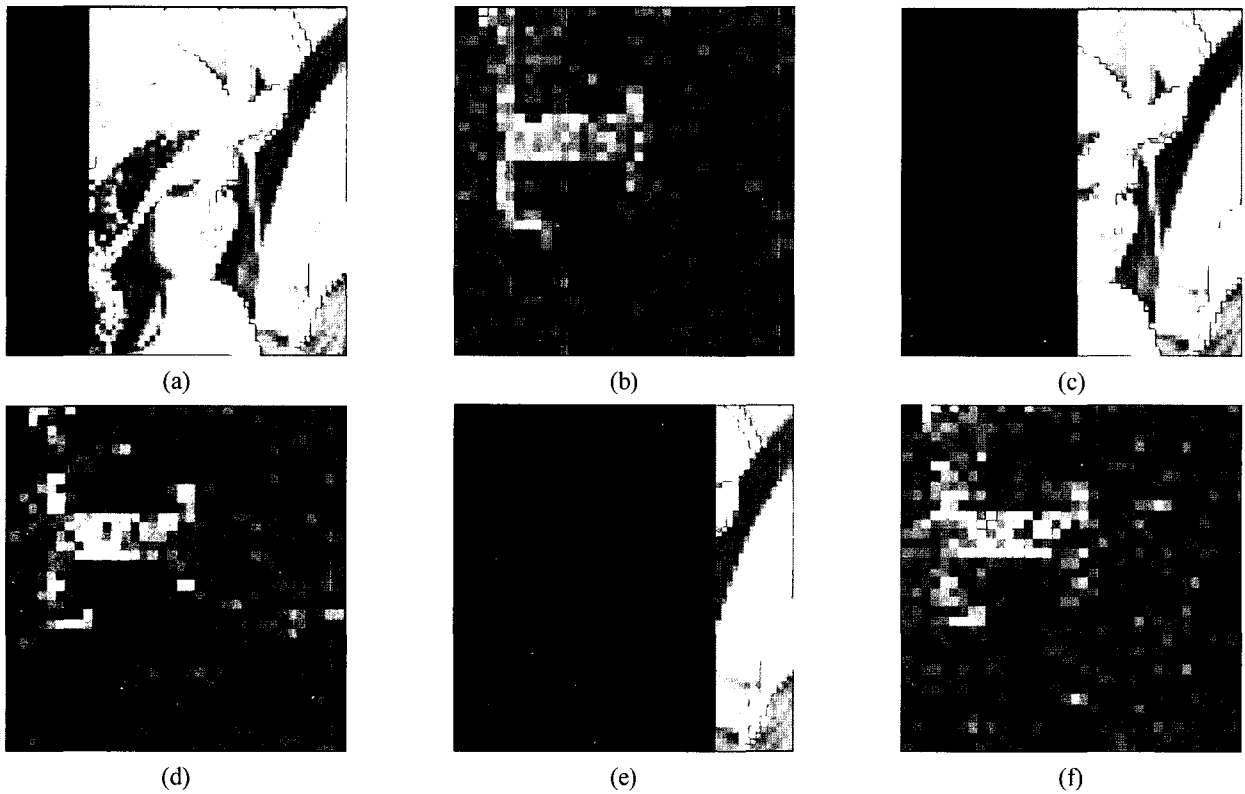


그림 6. 워터마킹된 영상의 절단에 따라 추출된 마크 영상 (a) 25% 절단된 워터마킹 영상, (b) (a)에 의해 추출된 마크 영상, (c) 50% 절단된 워터마킹 영상, (d) (c)에 의해 추출된 마크 영상, (e) 75% 절단된 워터마킹 영상, (f) (e)에 의해 추출된 마크 영상.

표 1. 영상의 절단에 따른 PSNR 값의 변화

Occlusion (%)	10	25	50	75
PSNR (dB)	31.28	28.17	25.12	22.00

$$PSNR = 20 \log_{10} \left\{ \frac{255}{\sqrt{MSE[R_d(\zeta, \eta)]}} \right\} \quad (7)$$

여기서 $R_d(\zeta, \eta)$ 는 절단된 워터마킹 영상으로부터 재생된 마크 영상을 나타내며, $R(\zeta, \eta)$ 은 절단 없이 재생된 마크 영상을 나타낸다. M 과 N 은 재생된 영상의 픽셀의 크기이며,

$E\{\cdot\}$ 는 기대값을 나타낸다. 워터마킹된 영상의 절단된 픽셀의 숫자가 증가할수록 PSNR값은 낮아지고, 재생 영상의 잡음이 증가하고 영상의 질이 많이 떨어지지만 원래의 영상의 형태대로 식별이 가능함을 알 수 있으므로 제안된 방법을 인증 시스템에 적용할 수 있다. 표 1에서는 워터마킹된 영상의 절단에 따른 PSNR값의 변화를 나타내고 있다.

IV. 광 실험

제안된 추출 시스템 구현을 위한 광 실험도는 그림 7과 같다. 워터마킹을 생성하는 과정은 컴퓨터에서 수치 해석적으로 수행되며 마크 영상의 추출 과정은 광학적인 방법으로 수행되어진다. 실험에 사용된 광원은 선형 편광된 파장이 632.8 nm 인 He-Ne 레이저이고, LCD는 해상도 800×600의 HoloEye사 LC2002 panel과 구동 회로를 사용하였으며, PULNiX사의 TM-1320-15CL CCD를 사용하여 추출된 영상을 기록하였다. L1 및 L2는 렌즈, SF는 Beam Expander로 사용 되는 Spatial filter를 나타낸다. 위상변조 특성을 가진 두 개의 LC SLM에

워터마킹 된 영상과 디코딩 키를 각각 올린 후 정확하게 매치시킨 다음 He-Ne 레이저 광을 투과시켜 L2렌즈에 의해 푸리에 변환 시킨 후 CCD 평면에서 마크 영상을 재생 한다. 그림 8은 광 실험에 의해 제안된 방법이 절단에 대해 얼마나 강인한가에 대한 결과를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 원 영상은 64×64 크기를 가진다. 강한 세기를 가지는 DC 성분이 나타나는 부분에 공간 필터를 위치시켜 재생 되는 영상의 가시성이 좋아지도록 하였다. 워터마킹 된 영상의 절단된 픽셀의 수가 증가할수록 재생 영상의 해상도가 떨어진다. 하지만 절단에 의한 이미지의 질은 떨어지나 인식이 불가능한 정도가 아니므로 어느 정도 절단에 대해 강인한 특성을 가진

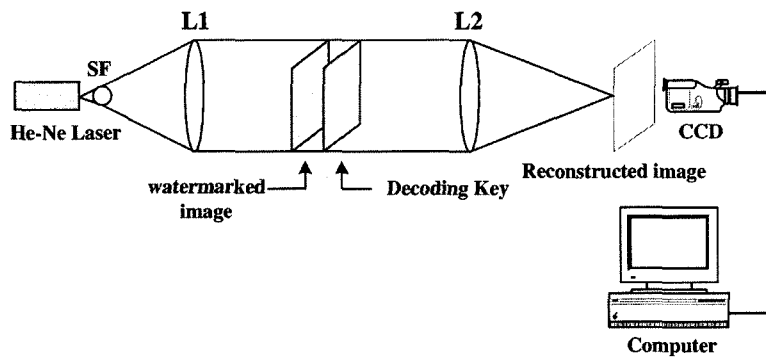


그림 7. 광 실험도.

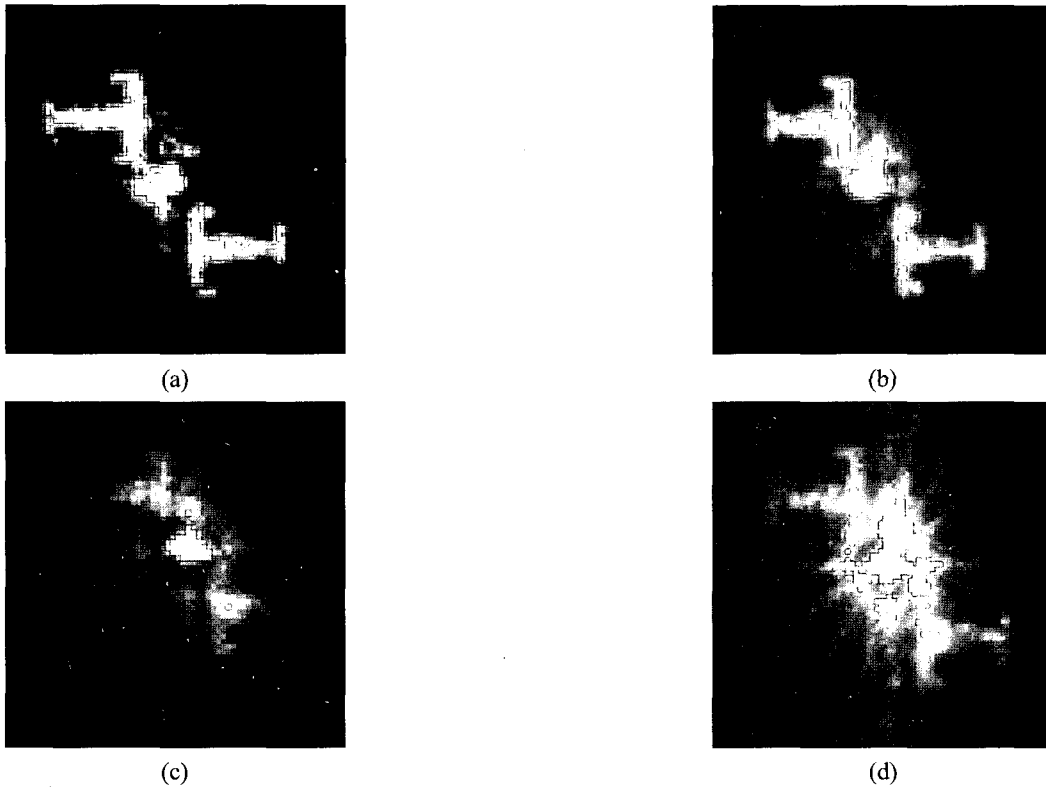


그림 8. 절단 된 워터마킹 된 영상에 대한 재생 영상 : (a) 절단되지 않은 워터마킹에 대한 재생 영상, (b) 25% 절단 된 워터마킹에 대한 재생 영상, (c) 50% 절단 된 워터마킹에 대한 재생 영상 (d) 75% 절단 된 워터마킹에 대한 재생 영상.

다. 기존에 발표된 방법의 경우, 대부분 광학적인 복호화 과정에서 원 영상을 가지고 있어야 영상의 진위 판별이 가능한 경우가 많으며 또한 원 영상이 마크 영상과 동일한 형태를 가지고 있으므로 유출될 가능성이 크다. 하지만 제안된 방법은 홀로그램으로 코딩된 원 영상을 이용하여 복호화 과정에서 복호화키를 사용하므로 영상의 진위 판별에 있어서 암호화의 성능을 향상시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 간섭계를 이용한 방법⁶⁾의 경우 픽셀 대 픽셀의 정합이 매우 어려우므로 이로 인해 재생 되는 마크 영상에 상당한 왜곡에 생겨 강인성에 대한 실험 자체가 매우 까다로우며 컴퓨터 모의실험의 결과가 화소의 절단율이 25%, 50%, 75%일 때의 PSNR이 13.31, 10.39, 7.69의 값을 가지며 서서히 감소되었다. 그러나 제안된 방법의 경우 실험도에서 나타난 것과 같이 복호화 과정은 직렬로 연결되어 화소 대 화소의 정합이 용이하며 PSNR의 값이 19.31, 17.73, 13.96의 값을 가지며 감소되어 향상된 특성을 나타내었다. 그림 8(c)와 8(d)의 경우 PSNR 값이 모의실험과 달리 급격히 감소되는데 이는 광 실험 시 사용되는 LCD의 픽셀과 픽셀 간의 간섭에 의한 격자 현상과 위상변조특성의 비선형성에 의해 절단율이 커질수록 PSNR값이 비선형적으로 감소되기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 컴퓨터 형성 홀로그램을 이용하여 수치 해석적인 방법으로 워터마킹을 생성시키고 광학적인 방법으로 삽입되어진 마크 영상을 추출할 수 있는 방법을 구현하였다. 제안된 방법에서는 이진 위상 컴퓨터 형성 홀로그램으로부터 분리되어진 위상 변조된 무작위 패턴을 원 영상에 적절하게 선형 중첩시켜 인간의 시각으로 원 영상과의 차이점을 구분할 수 없게 하였다. 재생 과정에서는 워터마킹 과정에서 생성된 디코딩 키를 이용하여 광학적으로 마크 영상을 추출할 수 있으므로 추출에 걸리는 연산 시간을 단축하여 실시간 처리가 가능함을 알 수 있었다. 또한 추출 과정에서 삽입된 이진 위상 홀로그램은 각각의 화소들이 마크 영상의 정보를 모두 포함하고 있으므로 절단에 대해 강인한 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 제안된 방법은 원 영상이 없더라도 키 영상을 가져야만 마크 영상을 추출하여 영상의 진위 여부를 판별할 수 있으므로 영상의 무분별한 복제와 배포를

막을 수 있다. 현재 사용되고 있는 광학 장비의 개선과 관련 기술의 발달로 인해 제안된 워터마킹 방법의 성능은 더욱 향상되리라 생각된다.

참고문헌

- [1] N. Takai and Y. Mifune, "Digital watermarking by a holography technique", *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 5, pp. 865-873, 2002.
- [2] S. Kishk and B. Javidi, "Information hiding technique with double phase encoding", *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 26, pp. 5462-5470, 2002.
- [3] Y. Aoki, "Fresnel Transform of Images for Application to Watermarking", *Electronics and Communications in Japan.*, part 3, vol. 84, no. 12, pp. 48-58, 2001.
- [4] Y. Aoki, "Watermarking technique using computer-generated holograms", *Electronics and Communications in Japan.*, part 3, vol. 84, no. 1, pp. 21-31, 2002.
- [5] D. Abookasis, O. Abramson, and J. Rosen, "Watermarking encrypted in a concealogram and deciphered by a modified joint-transform correlator", *Appl. Opt.*, vol. 44, no. 15, pp. 3019-3023, 2005.
- [6] 김병열, 서동환, 조규보, 신창목, 김수중, 김철수 "이진 위상 홀로그램과 광학적 간섭계를 이용한 디지털 워터마킹", *한국광학회지*, 14권, 4호 pp. 377-382, 2003.
- [7] K. T. Kim, J. H. Kim, and Eun-Soo Kim, "Multiple information hiding technique using random sequence and Hadamard matrix", *Opt. Eng.*, vol. 40, no. 11 pp. 2489-2494, 2001.
- [8] M. S. Kim, M. R. Feldman, and C. C. Guest, "Optimum encoding of binary phase-only filters with a simulated annealing algorithm", *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 6, pp. 545-547, 1995.
- [9] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1996.
- [10] T. J. Naughton, J. Frauel, B. Javidi, and E. Tajahuerce, "Compression of digital holograms for three-dimensional object reconstruction and recognition", *Electronics Appl. Opt.*, vol. 41, no. 20, pp. 4124-4132, 2002.

Digital watermarking technique using Computer-Generated Hologram and optoelectrical extraction algorithm

Kyu-Bo Cho, Chang-Mok Shin[†] and Soo-Joong Kim

School of Electrical Engineering & Computer Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

[†]*E-mail: lensless@ee.knu.ac.kr*

(Received October 7, 2005, Revised manuscript February 15, 2006)

We propose a digital watermarking technique using a computer generated hologram. The proposed method uses two random patterns separated from the computer generated hologram (CGH). One of those is embedded into the original image as hidden watermark information and then the reconstructed image can be obtained by an optical decoding algorithm with the other one as a decoding key. We analyze an occlusion of the watermarked image that is the original image containing the hidden pattern. The embedding process is performed digitally and reconstruction optically. Computer simulation and an optical experiment are shown in support of the proposed technique.

OCIS Codes : 070.2580, 090.1760, 100.3010.